

# 航空機の安全運行に寄与する 航空機搭載ドップラーライダー

田中久理\*  
古田 匡\*  
美濃部 正\*

*Airborne Doppler LIDAR Contributing to Safe Operation of Aircraft*

*Hisamichi Tanaka, Masashi Furuta, Tadashi Minobe*

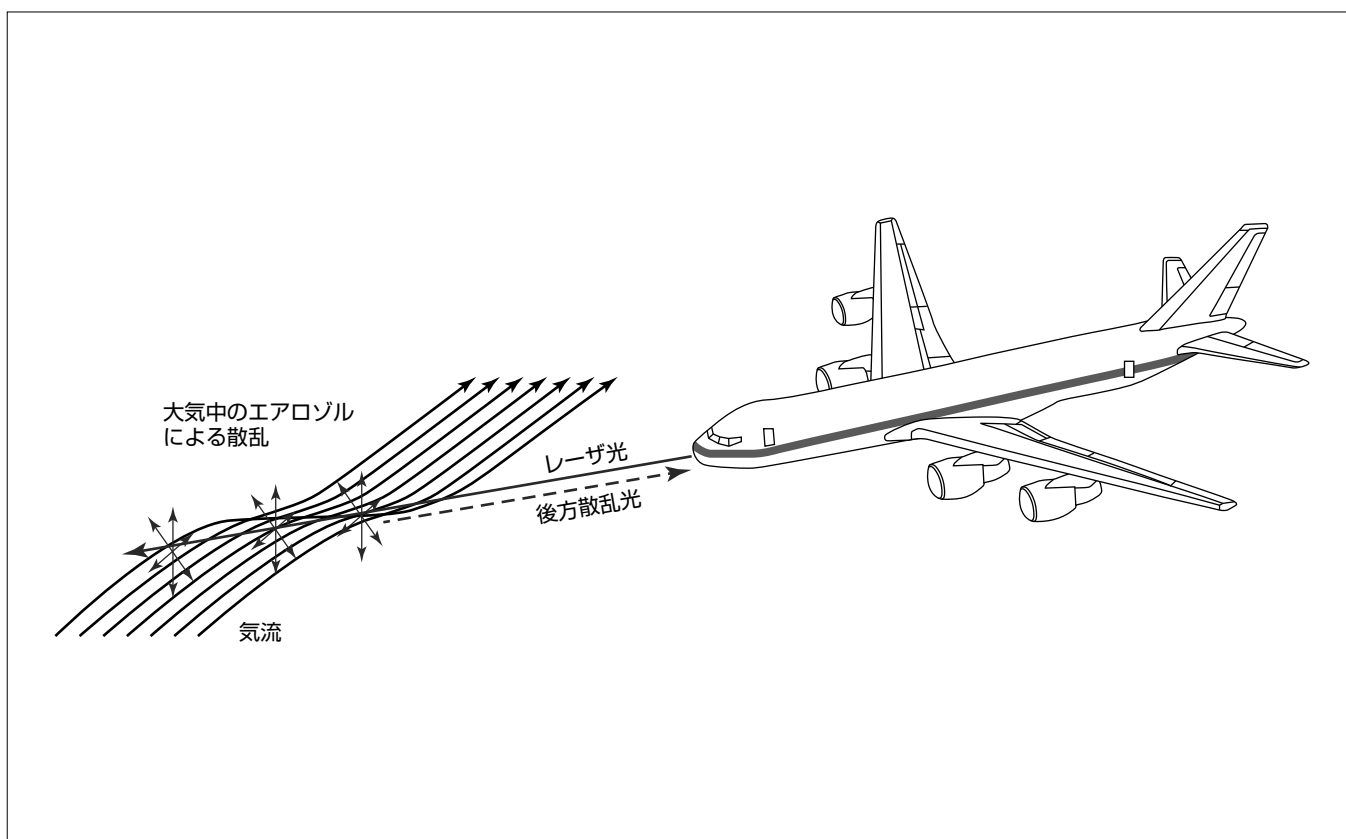
## 要 旨

旅客機の事故の約半数は乱気流等の気象現象に関連している。乱気流事故の防止のためには乱気流を検知又は予測して対策を講じることが有効である。

航空機搭載ドップラーライダー(LIDAR: LIght Detection And Ranging) (以下“航空機搭載ライダー”という。)は、航空機に搭載された気象レーダ等の従来機器では検知が困難な晴天乱気流に対して、レーザ光を用いた遠隔気流観測技術で検知し、パイロットへ情報を提供するとともに、最終的には制御技術によって機体の動揺を低減することで航空機の安全運航を可能とすることを目指している。

航空機搭載ライダーを用いたシステムの開発と導入を3段

階に分けて考えると、現在は最初の段階となる技術実証の段階にあり、この後、2023年頃までを試用期間と位置付け、2023年頃からは旅客機への搭載・普及段階と想定している。技術実証の段階では航空機搭載ライダーを小型ジェット機へ搭載し、高高度巡航時や離着陸時の乱気流検知の実験を予定しているほか、大型ジェット旅客機への搭載実験も検討中である。また、旅客機への搭載・普及段階の初期では、乱気流の“予告・警報装置”として導入され、続いて制御技術と統合することで“自動動揺低減装置”に発展すると予想している。



## 航空機搭載ライダー

航空機に搭載されたドップラーライダーから、航空機の前方向に向かってパルス状のレーザ光を放射する。レーザ光は大気中の微細な水滴やほこりなどのエアロゾル粒子によって散乱され、後方散乱された光の一部は航空機に搭載されたライダーに戻される。軽いエアロゾルは風と一緒に移動するので、散乱されたレーザ光の波長はドップラー効果のためにエアロゾルの速度に比例してシフトし、風速の測定が可能になる。

### 1. ま え が き

三菱電機では1990年代からドップラーライダーの開発を進めており、2000年にはレーザー光の発振・増幅・受信部分を光ファイバ部品で構成したドップラーライダーの開発に成功した。その後、長距離計測可能な高出力ライダーの開発を進め、長距離型ドップラーライダーの製品化を行ってきた。

本稿では当社が開発した乱気流の検知を目的としたドップラーライダーについて述べる。

### 2. 乱気流事故

国土交通省運輸安全委員会の事故調査報告書に基づいた分類によれば、日本の航空機事故の原因は図1に示すように約半数が乱気流などの気流変化が関連していると報告されている<sup>(1)</sup>。また、航空事故としては認定されない乱気流による軽傷以下の事故は、この事故データよりも数が多い。これらのことから、乱気流は航空機の安全を確保するために配慮すべき重要な因子と考えられる。

乱気流に遭遇した旅客機では、乗員や乗客が予期していないタイミングで機体が動揺し、身体や物品が浮き上がり、また、落下することによって客室内で事故に至る。

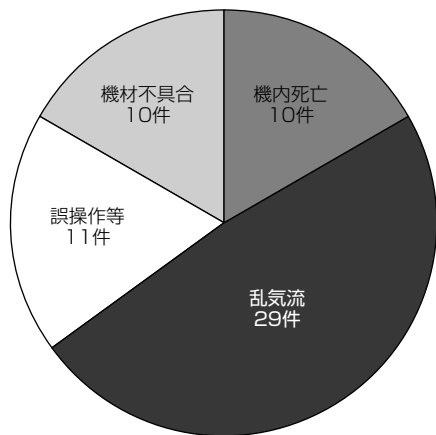


図1. 日本国内での大型航空機事故原因(1990~2008) (1)

このような事故の多くは、シートベルトを確実に締め、物品を固定してさえいれば防げる可能性が高いと言える。しかし、実際の旅客機では客室サービスの提供やエコノミークラス症候群の防止などのため、シートベルトを装着しつづけることは困難である。乱気流の遠隔観測によって遭遇前に乱気流で機体が動揺する可能性があることが分かれば、回避飛行やシートベルトサインの点灯などによって、乱気流事故を低減させることができる。

### 3. 航空機搭載ライダー

ドップラーライダーは、レーザー光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル(ちり等の微粒子)からの後方散乱光を受信し、そのドップラー周波数の変位(ドップラーシフト)を検出することで遠隔の風速を計測する装置である。

#### 3.1 航空機搭載ライダーの動作と原理

航空機に搭載されたドップラーライダーの動作の概念図を図2に示す。ドップラーライダーは航空機の前方の風の乱れを検知するため、航空機の前方向向かってパルス状のレーザー光を放射する。レーザー光は大気中の微細な水滴やほこりなどのエアロゾルによって散乱され、後方散乱された光の一部は航空機に搭載されたライダーに戻される。軽いエアロゾルは風と一緒に移動するので、散乱されたレーザー光の波長はドップラー効果のためにエアロゾルの速度に比例してシフトし、風速を測定できる。また、同時にレーザー光の送信パルスと後方散乱された光の受信との間の遅延を測定することによって距離情報も得ることができる。

図3のブロック図は、ドップラーライダーの動作原理を示す。1つの主発振器のレーザー出力をパルス増幅のための種光として使用すると同時に参照光としても使用する。種光は増幅器で増幅された後、光アンテナに伝送され航空機前方の大気に放射される。光アンテナは、遠方の大気中のエアロゾルからの微弱な後方散乱光を受信する。受信した後方散乱光の波長はエアロゾルの速度によってドップラーシフトし、風速はドップラーシフトに比例する。このドップ

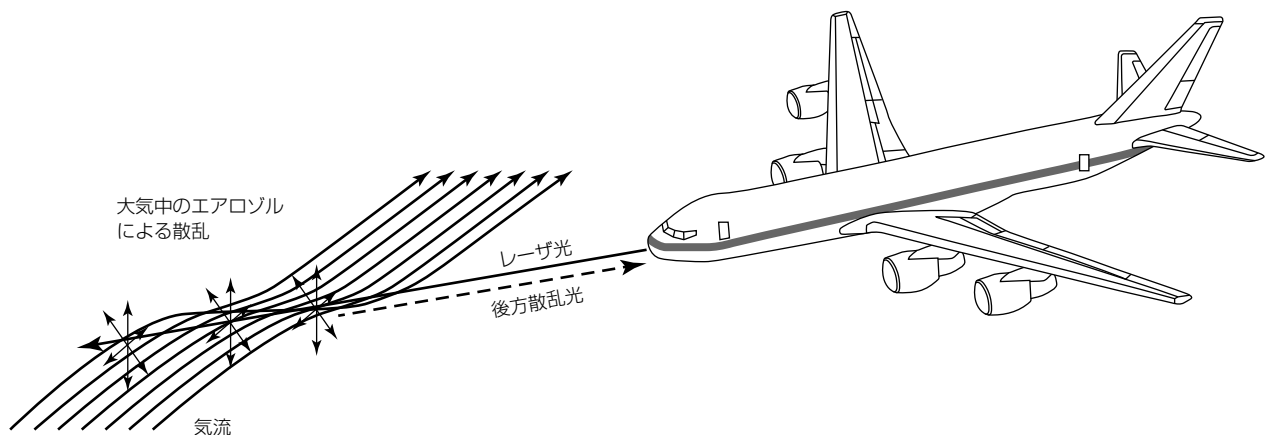


図2. 航空機搭載ライダーの動作概念図

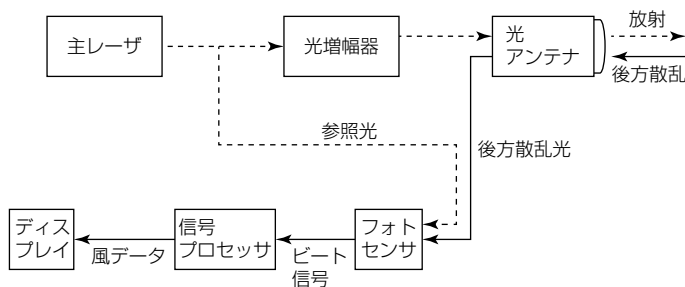


図3. ドップラーライダのブロック図<sup>(2)</sup>

ラーシフト量は、フォトセンサで後方散乱光を参照光と光学的に結合することで生成されたビート信号のパワースペクトルとして信号プロセッサによる処理で検出される。この処理で、レーザ光の送信パルスと後方散乱された光の受信との間の遅延時間量を複数の区間で区切ってセグメント化することで、距離区間でのセグメント化が行われる。これによって、複数のセグメント化された各距離区間の風速が同時にディスプレイでリアルタイムに監視できる。

ドップラーライダは大気中のエアロゾルからの散乱波を受信するため、晴天時の風速を計測できるという特長を持っている。しかしながら、航空機にドップラーライダを搭載して使用する場合、高度が高くなるにつれてエアロゾルの粒子密度が低下するため、高高度では風速の測定が困難になるという課題がある。

### 3.2 高出力光増幅器

当社は、2000年に光ファイバ部品で構成したドップラーライダの開発に成功し、その後、地上設置用の長距離型ドップラーライダを製品化した。この製品化に当たり、長距離の観測のために必要な高出力光増幅器の実用化にも成功している。当社の長距離型ドップラーライダに使用している高出力光増幅器は航空機搭載にも適した多くの特徴を備えている。光増幅器を使用したライダは、光学装置の小型化、省消費電力化、冷却システムの小型化に適した構成であり、また、防塵(ぼうじん)性があり、電磁ノイズの放射も少ないなどの点で航空機への搭載に適した方式と言える。さらに、取り回しの容易な光ファイバケーブルによって、レーザ源と送受信装置を分離でき、設置場所の制約が大きい航空機への搭載に当たり柔軟な配置が可能である。レーザ光としては、人間の目に対する安全性の高い1.5 $\mu\text{m}$ 帯を用いている。

当社が開発した光増幅器は、高ピークパワー光導波路増幅器方式を採用しており、地上設置用の長距離型ドップラーライダでは、3mJクラスの光アンテナ出力を実現している。

### 3.3 航空機搭載ライダの開発と飛行実験

図4は、2011年度に当社が開発した航空機搭載ライダの外観を示す。この製品は、光アンテナ部に光学望遠鏡及び導波路方式の光増幅器を内蔵し、光送受信部には主レーザ発振器及びドップラーシフトをビートとして検出するた



図4. 2011年度開発の航空機搭載ライダ<sup>(3)</sup>



図5. 航空機へのドップラーライダ搭載<sup>(1)</sup>

めのヘテロダイン検波器を内蔵している。また、信号処理はパソコンと高速デジタル信号処理ボードを含む複数の拡張ボードによって実現されている。冷却システムとして液体冷却を採用し、冷却装置によって、光増幅器、レーザダイオードなどの発熱を効率的に排熱することで装置の小型化を実現している。

この航空機搭載ライダは、小型ジェット機ガルフストリームII型に搭載され、実際の飛行実験<sup>(1)</sup>によって高高度での風観測の能力が実証された。小型ジェット機への搭載に当たっては、光アンテナ部以外の装置類(光送受信機、信号処理装置、冷却装置など)は、図5に示すように航空機のキャビンの左側のラックに設置され、光アンテナは、胴体の下部に設けたフェアリング内に収納し、フェアリングの前面に設けた窓から航空機の前方にレーザ光を放射するように構成されている。

#### 4. 今後の開発課題

これまでの航空機搭載ライダーの開発と実際の飛行実験を通じて、高高度での風観測の能力が実証されるとともに、旅客機に搭載するための次の2つの課題が明らかとなり、それらを解決する新技術の開発に取り組んでいる。

##### 4.1 観測距離の向上

先に述べたように旅客機が巡航する高高度では大気中のエアロゾルの密度が低いいため、散乱されるレーザー光の強度が低くなり、観測距離を確保することが難しい。この課題を解決するため、当社ではレーザー光の高出力化と、光学望遠鏡の高性能化の2つの技術を開発中である。

レーザー光の高出力化については、今まで当社のドップラーライダーに採用している高出力光増幅器を踏襲し、動作パラメータをチューニングすることによって基本性能を改善して高出力を得ることに加え、微小な偏光の揺らぎを自動的に補正する自動補正機構を開発中である。光学望遠鏡については、大口径化による光学基本性能の向上に加え、アクチュエータを用いた電動式焦点調整機構を開発中である。これらの技術を航空機搭載ライダーに採用することによって、高高度でも10kmを超える観測距離が安定して得られる性能を目指している。

##### 4.2 小型・軽量化

レーザー光を放射するための窓を設けたフェアリング内に収納する光アンテナ部は特に小型・軽量化の要求が厳しい装置であるが、観測性能の向上のためのレーザー光の高出力化による発熱量の増加、光学望遠鏡の高性能化に伴う大型化などは、小型・軽量化には不利な要因となる。観測性能を向上させつつ小型・軽量化を実現するために、幾つかの新技術の開発を進めている。光学望遠鏡にはカーボン繊維樹脂を用いた新素材の採用を進めており、小型・軽量でありながら強靱(きょうじん)で、しかも温度特性に優れた光学望遠鏡を実現する目処(めど)を得た。また、従来は光アンテナ装置内の光学定盤上に平面的に展開されて大きな面積を占めていた空間光学系は、新たに開発した三次元的な

折り返し構造を採用して小型化を進める予定である。

これらの新技術を採用した試作機は既に地上試験の段階に入っており、航空機への搭載に更に一步近づいたと考えている。

#### 5. むすび

旅客機の事故防止のために、乱気流を検知・予測することが重要である。乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダーは、レーザー光を用いた遠隔気流観測技術であるドップラーライダーを用いて乱気流を検知し、航空機の安全運航に寄与することを目指している。当社では、既に製品化している地上設置用のドップラーライダーを応用した航空機搭載用ライダーを試作し、乱気流検知の検証を進めている。

乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダーを実用化するためには、エアロゾル密度の低い高高度で使用可能にするための観測距離の向上と、航空機への搭載を容易にする小型・軽量化を進める必要がある。観測距離の向上のためには、レーザー光高出力化と光学望遠鏡の高性能化が必要となるが、これら2つは小型・軽量化には不利な要因となる。小型・軽量化を図るために、新素材の採用と三次元的な折り返し光学系を開発し、観測距離を向上させつつ小型・軽量化を両立させる装置の目処を得た。

新たに開発した要素技術を活用した試作機の地上試験を現在実施しており、乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダーの実用化に近づいている。

#### 参考文献

- (1) 乱気流検知技術の最新研究動向、公益財団法人航空機国際共同開発促進基金、解説概要22-1 (2010)
- (2) Inokuchi, K., et al.: Development of an Onboard Doppler LIDAR for Flight Safety, Journal of Aircraft, **46**, No. 4, 1411~1415 (2009)
- (3) 町田 茂: 乱気流事故防止機体技術(SafeAvio), JAXA航空シンポジウム2014資料 (2014)